

Análisis geomorfológico de una cuenca hidrográfica usando drones

y *Google Earth* para compararlas en un sistema de
información geográfica (SIG)

Análise geomorfológica de uma bacia hidrográfica utilizando drones e Google Earth
para comparação em um sistema de informação geográfica (SIG)

Geomorphological analysis of a hydrographic basin using drones and Google Earth
for comparison in a geographic information (GIS)

**Roberto Torres Hoyer, Andrea Navarrete Paz, Jesús Torres Hoyer,
Oswaldo José Peña Villegas y Jackeline Peña Suárez**

Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería
Departamento de Obras Civiles y Geología, Centro de Investigación (GEOKIMUN)
Temuco, Chile
rtorres@uct.cl; anavarrete2015@alu.uct.cl; j.torres@uct.cl; opena@uct.cl; jpena@uct.cl

Torres Roberto: <https://orcid.org/0000-0002-3701-2561>
Navarrete: <https://orcid.org/0009-0004-8071-9169>
Torres Jesús: <https://orcid.org/0000-0002-3573-8350>
Peña Villegas: <https://orcid.org/0000-0002-1165-6481>
Peña Suarez: <https://orcid.org/0000-0001-6025-6428>

Resumen

Se comparó geomorfológicamente una cuenca hidrográfica utilizando *Google Earth* y drones. Se realizaron veinte modelos digitales del terreno (MDT) de diez rutas en un área específica. Los MDT se representaron en un sistema de información geográfica (SIG) y se compararon utilizando el coeficiente de variación. Los resultados mostraron que los MDT generados con *Google Earth* tenían una menor variabilidad en comparación con los obtenidos con drones. Además, los drones generaron cuencas con áreas y perímetros más extensos que las realizadas por *Google Earth*. Las limitaciones de los drones fueron las condiciones climáticas y equipos complementarios, mientras que *Google Earth* tuvo limitaciones debido a la desactualización de las imágenes y a las alturas del terreno. A pesar de estas limitaciones, ambas herramientas son útiles para generar modelos digitales del terreno, con aplicaciones específicas según las necesidades del proyecto.

PALABRAS CLAVE: SIG; modelo digital de terreno; cuenca hidrográfica; parámetros morfométricos; drones.

Resumo

Uma bacia hidrográfica foi comparada geomorfologicamente usando o Google Earth e drones. Foram criados 20 modelos digitais de terreno (DTMs) de dez rotas em uma área específica. Os DTMs foram plotados em um Sistema de Informações Geográficas (GIS) e comparados usando o coeficiente de variação. Os resultados mostraram que os DTMs gerados com o Google Earth tinham uma variabilidade menor em comparação com os obtidos com drones. Além disso, os drones geraram bacias hidrográficas com áreas e perímetros maiores do que os produzidos pelo Google Earth. As limitações dos drones foram as condições climáticas e os equipamentos complementares, enquanto o Google Earth teve limitações devido a imagens e alturas de terreno desatualizadas. Apesar dessas limitações, ambas as ferramentas são úteis para gerar modelos digitais de terreno, com aplicações específicas de acordo com as necessidades do projeto.

PALAVRAS-CHAVE: GIS; modelo digital de terreno; bacia hidrográfica; parâmetros morfométricos; drones.

Abstract

A hydrographic basin was geomorphological compared using two tools: Google Earth and drones. Ten routes with different orientations were established in a specific area to obtain twenty digital terrain models (DTMs), ten generated by each tool. These models were represented in a Geographic Information System (GIS) to gain insight into the terrain relief of the studied area. Hydrographic basins were delineated, and their morphometric parameters were estimated, using the coefficient of variation as a measure of dispersion to compare the results obtained. The results indicate that the morphometric parameters calculated based on Google Earth show less variability compared to those obtained with drones. The basin generated by drones has a larger area and perimeter than the one delineated by Google Earth. Limitations of drone use are related to weather conditions, image processing software, and complementary equipment, whereas the limitations of Google Earth are associated with outdated and low-resolution images. Both tools serve the purpose of generating digital terrain models, but each has its particular limitations.

KEYWORDS: GIS; digital elevation model; hydrographic basin; morphometric parameters; drones.

1. Introducción

La comprensión y estudio de las cuencas hidrográficas ha sido facilitada por el uso de diversas herramientas que permiten analizar la superficie terrestre con mayor precisión (Tej *et al.*, 2022). En este contexto, el análisis geomorfológico de las cuencas hidrográficas se ha convertido en un área de investigación crucial para comprender los procesos geomorfológicos y la gestión del agua, Ibañez *et al.* (2011). En este sentido, se ha utilizado una combinación de tecnologías, como drones y *Google Earth*, para obtener información detallada sobre la morfometría de las cuencas y representarla en un sistema de información geográfica (SIG), (Mier, 2017).

La investigación se centró en el análisis geomorfológico de una cuenca hidrográfica utilizando, tanto drones como *Google Earth*, y posteriormente comparar los resultados obtenidos por cada herramienta. Se empleó un enfoque de investigación exploratoria y cuantitativa correlacional. Se seleccionaron diez rutas con diferentes orientaciones, en un área específica midiendo veinte modelos digitales del terreno (MDT), diez generados por cada herramienta.

Estos modelos se representaron en un SIG para obtener una visión completa y detallada del relieve de la cuenca estudiada (Navas, 2016). Además, se delimitaron las cuencas hidrográficas correspondientes a cada modelo y se estimaron parámetros morfométricos como la forma de la cuenca, considerando aspectos Área de la cuenca (medida de la superficie de una cuenca de drenaje), perímetro (frontera entre cuencas), pendiente (variación de la inclinación de una cuenca), longitud de cauce (la longitud del curso principal), (López, 1994).

Por otra parte, también tenemos la distancia al centro de gravedad (definida por la longitud existente entre el punto en cuestión y el punto en que el curso fluvial sale de la cuenca), ancho (la superficie de la cuenca por unidad de longitud de la misma), factor de forma (la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca), coeficiente de compacidad (parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la

cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca) y razón de elongación (relación entre el diámetro de un círculo que posea la misma área de la cuenca y cuyo diámetro sea igual a la longitud de la cuenca), (Cardona, 2015; Chow *et al.*, 1993 y Jardi, 1985).

El objetivo de este estudio fue llevar a cabo el análisis geomorfológico de una cuenca hidrográfica utilizando drones y *Google Earth*, para, posteriormente, comparar los resultados a fin de analizar la variabilidad y las diferencias de los parámetros morfométricos, mediante la aplicación de estas dos técnicas. Se utilizaron medidas de dispersión y gráficos de valores individuales para evaluar la distribución de los resultados y se comparó el coeficiente de variación entre ambas herramientas. Los resultados de este estudio proporcionarán información para comprender las ventajas y limitaciones de cada herramienta en el análisis morfométrico de cuencas hidrográficas, lo que contribuirá al desarrollo de enfoques más precisos y eficientes en futuras investigaciones

Ojeda *et al.* (2017) definen un VANT como vehículo aéreo reusable, controlado de forma remota, semiautónomo o autónomo, acondicionado para llevar dispositivos auxiliares para actividades de monitoreo o control. Otros términos son: drone, dron, UAV o RPA (*Remotely Piloted Aircraft*). Los VANTs presentan varias ventajas con respecto al uso de los vehículos tripulados o los satélites, como tener acceso a zonas de geografía complicada a baja altura y obtener imágenes de alta resolución en 'tiempo real' (Cheli, 2011) a muy bajo costo. Entre sus desventajas, se tiene la dependencia de una estación de seguimiento en tierra, costo de equipamiento y restricciones de peso, volumen de carga y tiempo de vuelo. Otra desventaja está relacionada con la regulación y normatividad de uso del espacio aéreo para este tipo de vehículos. Por ejemplo, en México, los drones sólo deben ser utilizados durante el día, en áreas que no estén clasificadas como restringidas o peligrosas.

Perilla y Mas (2020) señala que *Google Earth Engine* (GEE) es una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube; plantean

que esta herramienta puede ser una opción interesante para superar el rezago tecnológico y explorar las grandes bases de imágenes satelitales, resaltando la importancia de aprovechar las capacidades de *Google Earth Engine* para el análisis de imágenes satelitales a gran escala.

Mahala (2020) establece que su estudio realizado sobre el análisis morfométrico de cuencas hidrográficas en dos entornos morfoclimáticos diferentes proporciona información valiosa sobre las características hidrológicas y morfológicas de estas regiones. Los resultados indican que la cuenca del río Kosi, ubicada en un entorno tropical de montaña y llanura, presenta un mayor potencial de inundaciones en comparación con la cuenca del río Kangsabati. El uso de herramientas de teledetección y SIG ha sido fundamental para delimitar y comprender la morfometría de las cuencas hidrográficas en ambos entornos. Los hallazgos de este estudio son relevantes para la planificación y el manejo sostenible de las áreas estudiadas, ya que proporcionan una comprensión más profunda de las características hidrológicas y morfológicas en diferentes contextos morfoclimáticos.

Polat y Uysai (2017) establecen que, en la actualidad, los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones con diferentes propósitos. Sin embargo, sus beneficios no se detectan por completo debido a la capacidad de integración de otros equipos, como cámaras digitales, GPS o escáner láser. El objetivo principal de este estudio fue evaluar el rendimiento de las cámaras integradas en UAV para aplicaciones geomáticas, mediante la generación de un Modelo Digital del Terreno (DTM) en un área pequeña. Para ello, se realizaron mediciones de 7 puntos de control terrestre con Cinemática en Tiempo Real (RTK, por sus siglas en inglés) y se capturaron 420 fotografías. Se utilizaron más de 30 millones de puntos georreferenciados en el proceso de generación del DTM. La precisión del DTM se evaluó con 5 puntos de control. El error cuadrático medio se calculó en 17,1 cm para una

altitud de 100 m. Además, se utilizó un DTM derivado de Detección y Medición de Luz (LiDAR por sus siglas en inglés) como referencia para calcular la correlación. El DTM basado en UAV mostró una correlación del 94,5 % con el DTM de referencia. Los resultados del estudio demuestran que es posible utilizar los datos de fotogrametría de UAV para la producción de mapas, levantamientos topográficos y otras aplicaciones de ingeniería, con las ventajas de bajo costo, ahorro de tiempo y mínimo trabajo de campo.

Westoby *et al.* (2012) exponen que los métodos de relevamiento de alta resolución para aplicaciones geomorfológicas están acompañados de altos costos iniciales y adquisición de datos, así como de dificultades de portabilidad. En consecuencia, la relativa lejanía y la inaccesibilidad de muchos sitios de campo pueden hacer que estos enfoques sean poco prácticos. Este artículo describe una técnica fotogramétrica novedosa, revolucionaria y de bajo costo para obtener conjuntos de datos de alta resolución en diferentes escalas. Denominada '*Structure-from-Motion*' (SfM), la técnica se basa en la misma premisa básica de la fotogrametría estereoscópica.

A diferencia de los métodos fotogramétricos tradicionales, que requieren conocer la ubicación tridimensional y la posición de la(s) cámara(s) o la ubicación tridimensional de una serie de puntos de control para facilitar la triangulación y reconstrucción de la escena, el enfoque SfM no requiere que se conozca ninguno de los dos antes de la reconstrucción de la escena.

En cambio, la posición de la cámara y la geometría de la escena se reconstruyen simultáneamente mediante la identificación de características coincidentes o puntos clave en múltiples imágenes y la aplicación posterior de una solución iterativa de mínimos cuadrados. Sin embargo, la salida de SfM se basa en un sistema de coordenadas relativas, no absolutas, por lo que se requiere cierto grado de control terrestre si los datos se van a utilizar de manera cuantitativa. En conclusión, se compara la salida de SfM con datos adquiridos mediante Escáner Láser Terrestre (TLS) en un acantilado marino de

~80 m de altura cerca de Aberystwyth, Gales, Reino Unido. Se produjeron Modelos Digitales de Elevación de Diferencia (DoD), lo que permitió un detallado análisis de los datos SfM.

2. Metodología

La investigación consta de dos tipos, en primer lugar, metodología netamente exploratoria, por medio de la recolección de datos en terreno bajo las diferentes herramientas innovadoras, para luego aplicar una metodología de tipo cuantitativa correlacional, que permite la comparación y análisis estadístico de los parámetros morfométricos medidos en la primera etapa, de la cuenca hidrográfica a través de los datos obtenidos mediante las herramientas dron y *Google Earth*.

2.1 Los equipos utilizados constaron de:

- ✓ *Dron DJI Mavic Air 2*: Un dron equipado con cámara estabilizada, modos de vuelo inteligente y sistema anticolidión. Permite capturar imágenes de alta resolución y volar a alturas significativas.
- ✓ *Estación Total Nikon 322*: Una estación que permite medir distancias, ángulos y coordenadas precisas en el terreno. Es utilizada para obtener puntos de control terrestres y realizar levantamientos topográficos de alta precisión.

2.2 Utilización de softwares para el procesamiento de los datos como los son:

- ✓ *Google Earth Engine*: Una herramienta en la nube que permite realizar análisis geoespaciales. Proporciona capacidades de procesamiento y almacenamiento de datos para examinar imágenes satelitales a gran escala.
- ✓ *Dronelink*: Una aplicación de pago que permite crear planes de vuelo para diversos propósitos, como mapeo y fotografías panorámicas 360°. Compatible con el dron Mavic Air 2, permite la previsualización del vuelo y ofrece información sobre el área de la malla generada, baterías requeridas y tiempo de inicio de la captura de imágenes.

- ✓ *Agisoft Metashape*: Un software que procesa miles de imágenes aéreas obtenidas tanto por vuelos fotogramétricos convencionales como por UAVs (aviones no tripulados). Permite generar ortofotos georreferenciadas de alta resolución y modelos digitales de elevación (DSM) con alto nivel de detalle. Ofrece un flujo de trabajo automatizado y permite realizar mediciones y obtener puntos de control terrestres de alta precisión.
- ✓ *ArcGIS Pro*: Un software de sistemas de información geográfica (SIG) avanzado desarrollado por ESRI. Permite la integración, análisis y visualización de datos geográficos en mapas y escenas en 3D. *ArcGIS Pro* ofrece una amplia gama de herramientas y funcionalidades para realizar análisis geomorfológicos y representar los resultados en un entorno de SIG.

Como se puede apreciar en la FIGURA 1, se debe seguir una metodología asociada y que se describe a continuación:

- ✓ Adquisición de datos mediante drones: se utiliza dron equipado con cámaras fotográficas de alta resolución para capturar imágenes aéreas de la cuenca hidrográfica desde diferentes ángulos y alturas.
- ✓ Recopilación de imágenes de *Google Earth*: se utilizan imágenes de *Google Earth* que cubran la misma área de la cuenca hidrográfica.
- ✓ Procesamiento de imágenes: las imágenes capturadas por los drones y las imágenes de *Google Earth* se procesan utilizando técnicas de fotogrametría y SfM (*Structure-from-Motion*) para generar modelos digitales del terreno (MDT) de alta resolución. Se aplican algoritmos y software especializados para la reconstrucción tridimensional de la superficie de la cuenca.
- ✓ Integración de datos en un SIG: los MDT generados a partir de los datos de los drones y *Google Earth* se integran en un sistema de información geográfica (SIG). Se utilizan herramientas y software SIG para representar y visualizar los parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica (Sumaran, 2010).

- ✓ Análisis geomorfológico: se realizan análisis cuantitativos y cualitativos de los datos morfométricos de la cuenca hidrográfica utilizando las capacidades del SIG. Se evalúan parámetros de área de la cuenca, perímetro, pendiente, longitud del cauce principal, distancia al centro de gravedad, ancho, factor de forma, coeficiente de compacidad y rango de elongación, por medio de un análisis de correlación lineal y dispersión de los datos obtenidos y calculados desde el *Google Earth Engine* y el dron.
- ✓ Interpretación y conclusiones: se interpretan los resultados obtenidos y se extraen conclusiones sobre la eficacia y utilidad del uso de drones y *Google Earth* para el análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica. Se discuten las limitaciones y posibles mejoras en el método.
- ✓ Al realizar mediciones y recopilar datos con drones y otras herramientas geoespaciales, es importante considerar la incertidumbre y los errores asociados. La teoría de errores proporciona un marco para comprender y cuantificar estos, teniendo en cuenta factores como la precisión de los equipos de medición, la precisión del posicionamiento GPS y otros posibles errores sistemáticos o aleatorios (Otero *et al.*, 2010).
- ✓ Una vez recopilados los datos de las medidas obtenidas o calculadas de cada parámetro morfométrico, se calcula la media, varianza que sirven para establecer un coeficiente de comparación evaluando la variabilidad y la dispersión de los valores obtenidos. Esto puede ser especialmente relevante al comparar los resultados de diferentes mediciones para la comparación de datos obtenidos mediante drones y *Google Earth*. Las medidas de dispersión permiten determinar la consistencia de los resultados,

identificar valores atípicos o anomalías, y evaluar la precisión y confiabilidad de las mediciones en el contexto del análisis geomorfológico de la cuenca hidrográfica.

- ✓ El coeficiente de variación de Pearson es una medida estadística que se utiliza para evaluar la dispersión de un conjunto de datos en relación con su media, independientemente de las unidades de medida utilizadas (Cid, 2013). Este coeficiente se expresa como un porcentaje y varía de 0 a 100 %.
- ✓ Según Rustim (2012) para calcular el coeficiente de variación de Pearson, Ecuación 1, primero se calcula la desviación estándar de los datos y luego se divide esta desviación estándar por la media de los datos, multiplicando el resultado por 100 para obtener el porcentaje.

La fórmula para calcular el coeficiente de variación de Pearson es la siguiente:

$$Cv = \left(\frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Media}} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

CV: es el coeficiente de variación

La desviación estándar es una medida de dispersión que indica cuánto se desvían los valores individuales de la media

La media es el promedio de los valores en el conjunto de datos

Una vez calculado el coeficiente de variación, podemos interpretarlo de la siguiente manera:

Un coeficiente cercano a 0 % indica que los datos tienen poca dispersión y están relativamente cerca de la media. Un coeficiente cercano al 100 % indica que los datos están muy dispersos y distantes de la media.

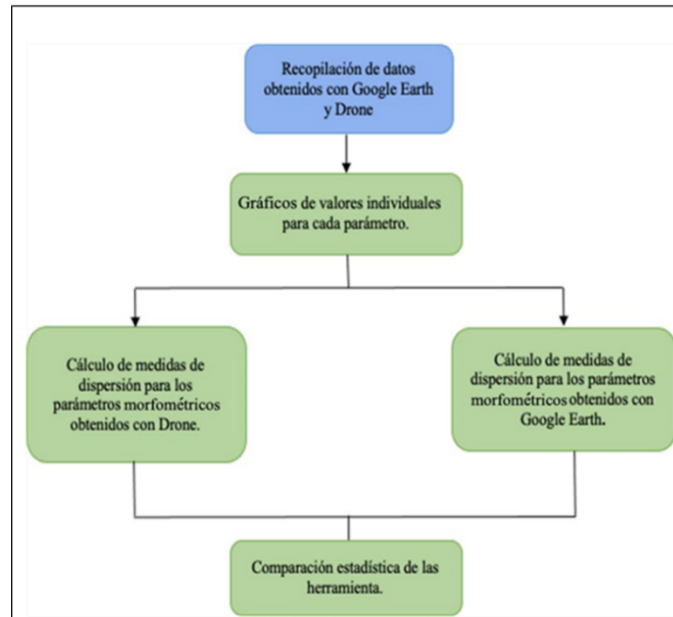


FIGURA 1. Metodología implementada

4. Resultados

La zona de interés se encuentra geográficamente a un costado del acceso norte de la ciudad de Lautaro, específicamente en las coordenadas TM de la TABLA 1 de la Región de La Araucanía. La siguiente tabla representa las coordenadas de ubicación de la zona de estudio. Para realizar la comparación morfométrica se seleccionaron nueve parámetros que caracterizan una cuenca hidrográfica. Estos son: área, perímetro,

pendiente media, longitud del cauce principal, distancia al centro de gravedad, ancho, factor forma, coeficiente de compacidad y razón de elongación. Con el fin de comparar la distribución y dispersión de los resultados, se realizó una recolección de datos en terreno con diferente disposición espacial o ruta, TABLA 2, y como ejemplo, se puede apreciar en la FIGURA 2 con la ruta 7 de norte a sur.

TABLA 1. Coordenadas de zona de estudio. Fuente: Comparación a través de Drone y *Google Earth* para su representación en SIG

PUNTO	ZONA	ESTE	NORTE
V1	18 H	722209	5732971
V2	18 H	722021	5732220
V3	18 H	722801	5732758
V4	18 H	722577	5732052

TABLA 2. Rutas o disposición espacial para la recolección de la data de cuenca. Fuente: elaboración propia

Nº ruta	Orientación
1	WNW - ESE
2	NNE - SSW
3	NW - SE
4	ENE - WSW
5	NNW - SSE
6	NE - SW
7	N - S
8	WNW - ESE
9	E - W
10	WNW - ESE

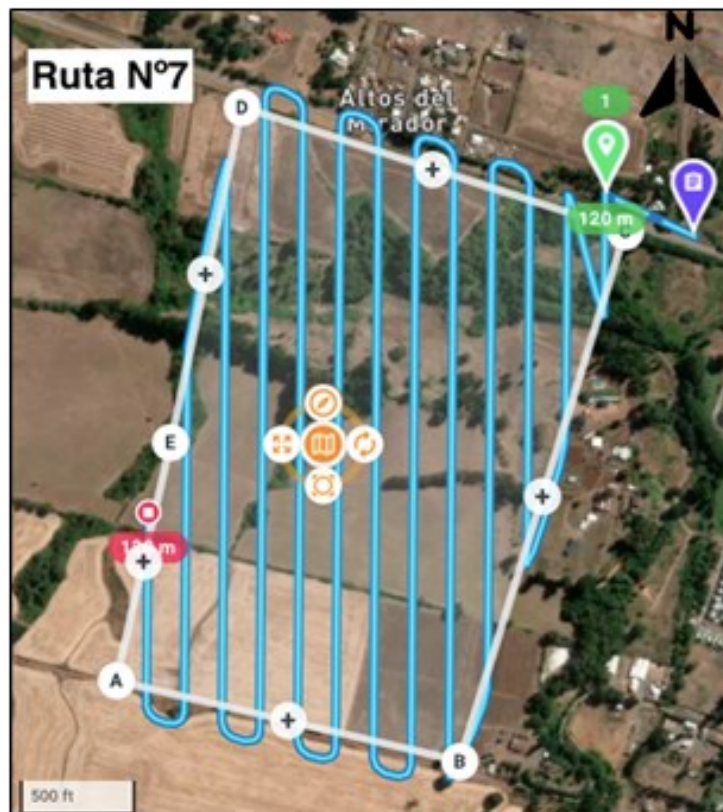


FIGURA 2. Zona de estudio, donde se observa las rutas en líneas azules para la recolección de datos tanto del drone como del *Google Earth Engine* ruta 7

En las FIGURAS 3 Y 4, se pueden apreciar los resultados de MDT, área de la cuenca, así como la longitud del cauce, medidos por el drone y *Google Earth*, teniendo en consideración la orientación de recorrido para la obtención de las mediciones, donde se puede apreciar, las rutas 1 y 9, respectivamente. Se eligieron estos, debido a que fueron más elocuentes al momento de realizar una comparación visual. Las imágenes superiores corresponden a los modelos digitales de elevación, así como las inferiores al área de la cuenca con el cauce principal. Las ubicadas a la

izquierda corresponden a los resultados obtenidos y calculados de *Google Earth Engine*, mientras que a la derecha corresponden a los resultados obtenidos y calculados de los datos medidos por el drone, observándose un mayor nivel de detalle con el drone que con *Google Earth* en el MDT, así como en las áreas como en las longitudes de los cauces fueron mayores las medidas por el drone que las tomadas por *Google Earth*.

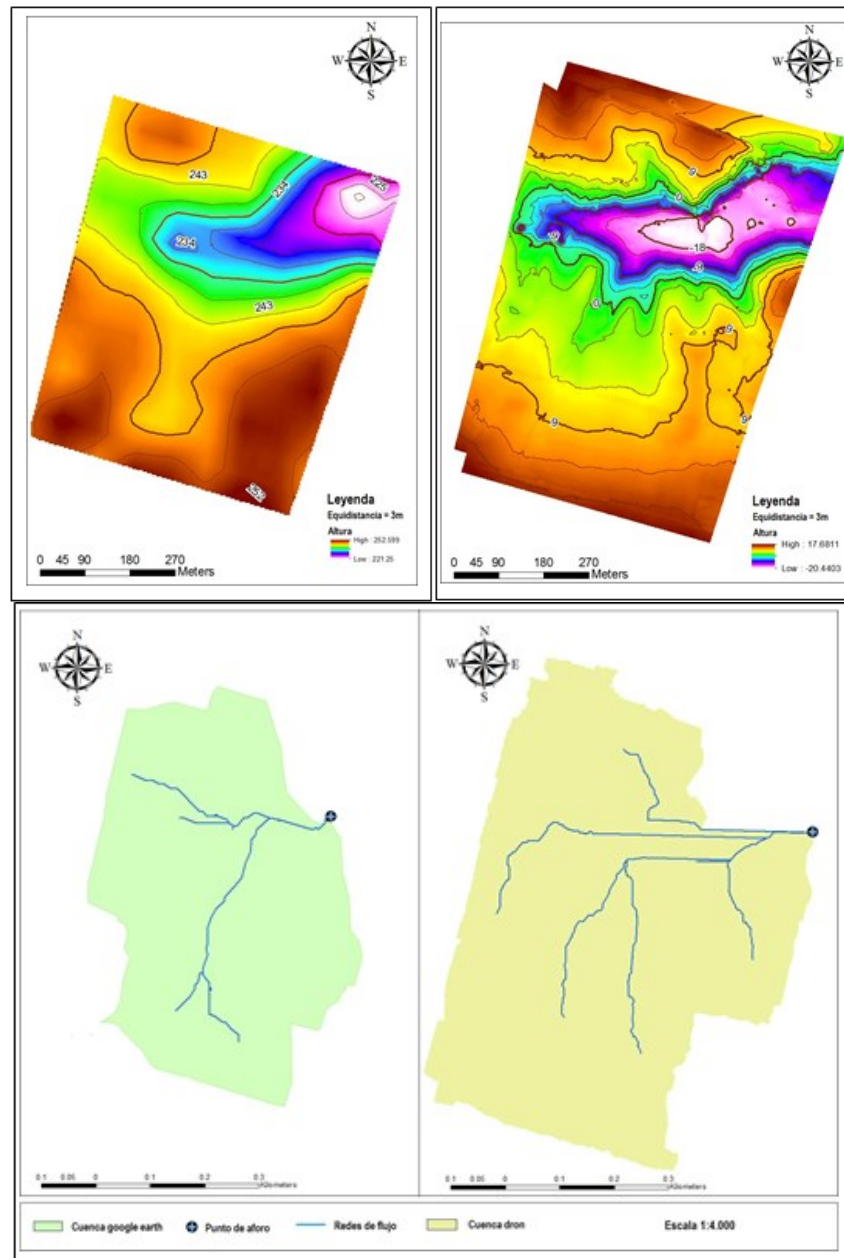


FIGURA 3. Resultados de la ruta 1, al lado izquierdo de la imagen MDT, área de cuenca (verde) y longitud de cauce principal calculadas por los datos tomados *Google Earth Engine*, y lado derecho de la imagen MDT, área de cuenca (amarilla) y longitud de cauce principal calculados con los datos tomados por el drone

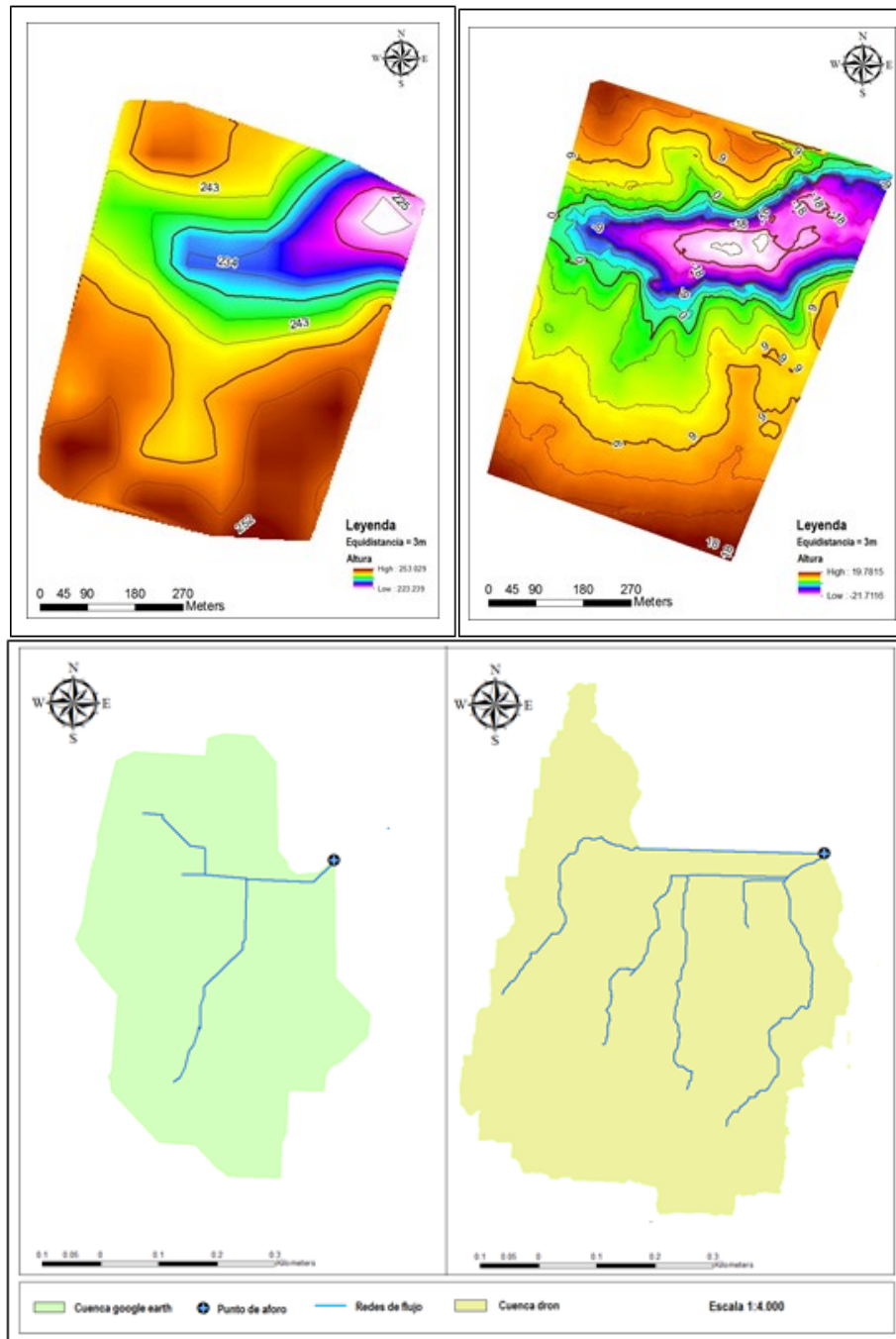


FIGURA 4. Resultados de la ruta 9, al lado izquierdo de la imagen MDT, área de cuenca (verde) y longitud de cauce principal calculadas por los datos tomados *Google Earth Engine*, y lado derecho de la imagen MDT, área de cuenca (amarilla) y longitud de cauce principal calculados con los datos tomados por el drone

5. Discusión de resultados

Analizando los gráficos de valores individuales de la FIGURA 4, podemos observar que notoriamente los datos obtenidos con dron presentan una mayor dispersión, en

comparación a los obtenidos con *Google Earth*. Esto es debido a que los valores del dron presentan más lejanía entre sí. De manera contraria, los datos medidos de *Google Earth* muestran más cercanía entre sus datos. Por otro

lado, el gráfico de valores nos permite identificar valores atípicos, como es en el caso del parámetro 'distancia al centro de gravedad' calculado con dron. Este valor atípico puede distorsionar los resultados finales por lo que debe ser excluido del análisis.

Las medidas de dispersión representadas en la FIGURA 5 permiten comprobar lo descrito anteriormente, ya que mediante estas podemos determinar numéricamente la variabilidad de ambas herramientas.

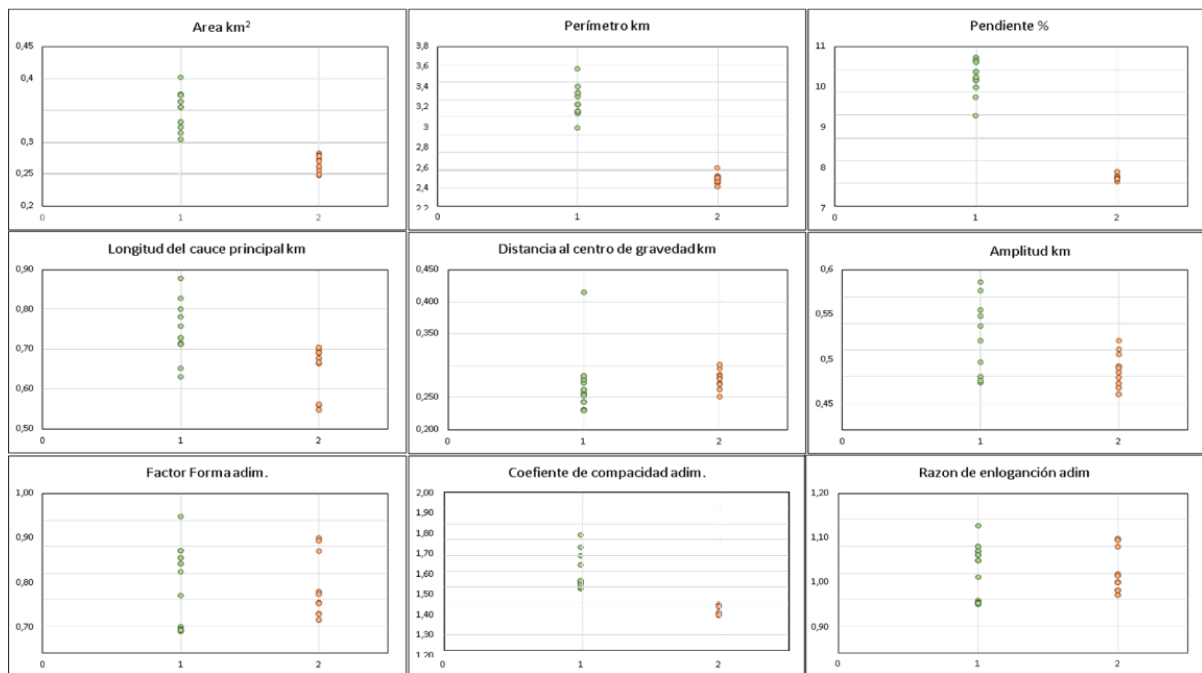


FIGURA 5. Gráficos de dispersión de resultados en verde, los obtenidos para el dron, en Naranja, para Google Earth Engine de: área de la cuenca, perímetro, pendiente, longitud de cauce principal, distancia al centro de gravedad, ancho o amplitud, factor de forma, coeficiente de compacidad y razón de elongación, de cada recorrido de recolección de datos tanto del dron como desde el Google Earth Engine, de la ruta 1 a la 10

La desviación estándar es uno de los datos obtenidos que nos ayuda a determinar la dispersión de los datos en función de la media aritmética, por lo que entre más cercano a 0 sea este valor menor será la dispersión de los datos (Trueba *et al.*, 2014; Salazar y Castillo, 2018). Como podemos ver en la TABLA 3, los resultados estadísticos calculados de cada una de las herramientas, así como en la FIGURA 6, se observa la comparación del coeficiente de variación de cada parámetro geomorfológico analizados, y

resaltando que, la desviación estándar es menor en todos los parámetros morfométricos obtenidos con Google Earth, lo que indica una menor variabilidad de los resultados respecto a los obtenidos con dron. Sin embargo, no podemos realizar una comparación numérica de la variabilidad debido a que cada parámetro tiene una unidad de medida diferente. Para ello, se utiliza el coeficiente de variación de Pearson.

TABLA 3. Comparación de los resultados de correlación estadística de cada una de las herramientas utilizadas. Fuente: elaboración propia

Variable a analizar	Google Earth Engine					Drone				
	Media	Desviación estándar	Rango	Desviación media	Coefficiente de Variación	Media	Desviación estándar	Rango	Desviación media	Coefficiente de Variación
Área (km ²)	0,27	0,012	0,03	0,011	4,7	0,35	0,032	0,098	0,027	9,1
Perímetro (km)	2,31	0,057	0,21	0,04	2,5	3,18	0,185	0,67	0,141	5,9
Pendiente (%)	5,25	0,11	0,24	0,082	2,2	9,59	0,79	2,56	0,577	8,2
Longitud del cauce principal (Km)	0,65	0,063	0,157	0,054	9,8	0,75	0,076	0,246	0,061	10,2
Distancia al centro de gravedad (Km)	0,28	0,015	0,05	0,011	5,3	0,26	0,022	0,055	0,016	7,7
Ancho o Amplitud (km)	0,41	0,033	0,1	0,026	7,9	0,47	0,071	0,19	0,06	14,9
Factor forma (adim)	0,65	0,119	0,31	0,099	18,3	0,65	0,155	0,43	0,133	23,9
Coefficiente de compacidad (adim)	1,26	0,026	0,07	0,022	2	1,52	0,118	0,34	0,1	7,8
Razón de elongación (adim)	0,91	0,081	0,21	0,067	9	0,9	0,108	0,29	0,094	12

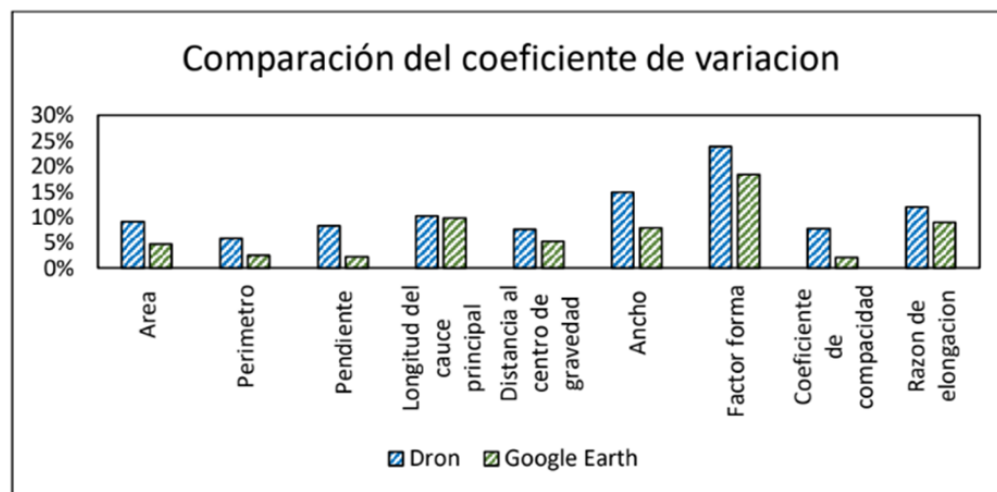


FIGURA 6. Comparación del coeficiente de variación entre métodos

Respecto a la tabla se puede identificar que la diferencia de variación más relevante es de un 7 %, la cual correspondería al parámetro 'amplitud o ancho de la cuenca' y la menos relevante corresponde al parámetro 'longitud del cauce

principal', el cual corresponde a un 0,4 %. En promedio, la variabilidad de los datos obtenidos con dron para estimar los parámetros morfométricos corresponde a un 11,1 % y con *Google Earth* corresponde a un 6,9 %.

Tomando en consideración el promedio de los resultados obtenidos la cuenca generada con dron, posee un área y perímetro más extenso que la cuenca delimitada en base a Google Earth, teniendo una diferencia de 0,08 km² u 8 ha en cuanto al área y 0,87 km en el perímetro. En cuanto a la amplitud o ancho de la cuenca, hay una diferencia menos significativa de tan solo 0,06 km, al igual que la longitud del cauce principal y la distancia al centro de gravedad, donde las diferencias son menores.

El parámetro que más diferencia numérica presenta es la pendiente, ya que con dron se obtuvo una pendiente promedio de 9,59 % y con Google Earth de tan solo un 5,25 %. Es decir, existe una diferencia de un 4,34 % entre ambos resultados.

Finalmente, los parámetros asociados a la forma de la cuenca (factor forma, coeficiente de compacidad y razón de elongación) son similares para ambas herramientas por lo que coinciden en que la cuenca estudiada es alargada y oblonga.

6. Conclusiones

Para la elaboración de los modelos digitales del terreno y la delimitación de la cuenca hidrográfica en la salida norte de Lautaro, se realizaron 10 rutas diferentes utilizando las herramientas Google Earth y Dron. Los resultados permitieron comparar estadísticamente los parámetros morfométricos de la cuenca y determinar su variabilidad y precisión.

Se utilizó la teoría de errores y medidas de dispersión para analizar nueve parámetros morfométricos y se encontró que el Dron presenta una mayor variabilidad en comparación con Google Earth. Los parámetros que más difieren entre las herramientas son el ancho o

amplitud de la cuenca y la pendiente de la cuenca.

La complementación del dron con los puntos de control tomados por la estación *Total Nikon 322* fue crucial para mejorar la precisión de las imágenes y reducir el error compuesto. Esto proporcionó un modelo más ajustado a la realidad y permitió comparar la exactitud de ambas herramientas. Los resultados obtenidos con el dron en la ruta 2 son los que se asemejan más al modelo de referencia.

Los modelos digitales del terreno generados mediante fotogrametría con el dron ofrecen un mayor nivel de detalle en comparación con los realizados con Google Earth. Este último utiliza imágenes satelitales no actualizadas, lo que resulta en representaciones topográficas más generalizadas. Sin embargo, el dron enfrenta limitaciones relacionadas con los puntos de control, la vegetación y las sombras, lo que contribuye a la variabilidad de los resultados.

Ambas herramientas cumplen con la función de generar modelos digitales del terreno, pero presentan diferentes limitaciones. Los resultados del dron pueden ser aplicados en proyectos como minas a cielo abierto, caminos y áreas planas con poca vegetación. Por otro lado, *Google Earth* es útil en proyectos que no requieren imágenes actualizadas o cuando se necesita obtener información histórica de un lugar específico.

En resumen, tanto el dron como *Google Earth* son herramientas válidas para la generación de modelos digitales del terreno, y su elección depende de las necesidades específicas del proyecto y las limitaciones asociadas a cada herramienta.

7. Referencias citadas

CARDONA, B. L. 2015. "Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas". Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20básicos%20de%20Morfometría%20de%20Cuencas%20Hidrográficas.pdf>. [Consulta: octubre, 2023]

CHELI, A. 2011. *Introducción a la Fotogrametría y su evolución*. Consejo Profesional de Agrimensura de la Provincia de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina

- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. & L. MAYS. 1993. *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill. Santiago de Chile, Chile.
- CID., C. A. 2013. "Comparación de volúmenes con datos de diferentes fuentes". Disponible en: <http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/2442/3/Aedo%20Cid.pdf>. [Consulta: octubre, 2023]
- GOOGLE EARTH. (s.f.). "Preguntas frecuentes". Disponible en: <https://www.google.com/intl/es/earth/education/faq/>. [Consulta: octubre, 2023]
- IBAÑEZ, S.; MORENO, R. y J. GISPERT. 2011. *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- JARDI, M. 1985. "Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos definen". *Revista de Geografía*, 21: 41-68
- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, L. 1994. *Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión*. TRAGSA, MUNDI-PRENSA. Madrid, España.
- MAHALA, A. 2020. "The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings". *Appl Water Sci*, 10: 33. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>.
- MIER, V. 2017. "Breve historia de los SIG. Obtenido de Mundo GIS y arqueología". (Noviembre de 2017). Disponible en: <http://mundogis.info/blog/2017/11/22/la-historia-de-los-sig-sistema-de-informacion-geografica/>. [Consulta: octubre, 2023]
- NAVAS, M. A. 2016. "¿Que son los drones?". Disponible en: <https://www.profesionalreview.com/2016/03/04/que-son-los-drones-toda-la-informacion/>. [Consulta: octubre, 2023].
- OJEDA-BUSTAMANTE, W.; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, A.; MAURICIO-PÉREZ, A. y J. FLORES-VELÁZQUEZ. 2017. "Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola". *Tecnología y ciencias del agua*, 8(4): 157-166. Disponible en: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-10>.
- OTERO, I.; EZQUERRA, A.; RODRÍGUEZ-SOLANO, R.; MARTÍN, L. e I. BACHILLER. 2010. *Topografía, cartografía y geodesia. Apuntes de Ingeniería Geodésica y Fotogrametría*. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- PERILLA, G. y J. MAS. 2020. "Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube". *Investigaciones geográficas*, (101): e59929. Disponible en: <https://doi.org/10.14350/rig.59929>.
- POLAT, N. & M. UYSAL. 2017. "DTM Generation with UAV based Photogrammetric point cloud." *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-4/W6. 77-79. Disponible en: [10.5194/isprs-archives-XLII-4-W6-77-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W6-77-2017).

- RUSTIM, A. 2012. *Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia*. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile
- SALAZAR, C. y S. D. CASTILLO. 2018. "Fundamentos básicos de estadística". Disponible en: <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/B0009.pdf>. [Consulta: octubre, 2023].
- SUMARAN, G. E. 2010. "Aplicación de los sistemas de información geográfica en la ingeniería civil". Disponible en: <https://es.slideshare.net/GERARDOHENRY/ponencia-sigok>. [Consulta: octubre, 2023].
- TEJ BAHADUR S.; CHENG-YUAN, X.; ARJUN, N. & W. GUO. 2022. "Machine learning methods for precision agriculture with UAV imagery: a review[J]." *Electronic Research Archive*, 30(12): 4277-4317. Disponible en: doi: [10.3934/era.2022218](https://doi.org/10.3934/era.2022218).
- TRUEBA, C.; REMUZGO, L.; JORDÁ, V. y J. SARABIA. 2014. *Medidas de posición y de dispersión*. Universidad de León. España.
- WESTOBY, M.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N.; HAMBREY, M. & J. REYNOLDS. 2012. "Structure-from-Motion photogrammetry: a novel, low-cost tool for geomorphological applications". *Geomorphology*, (179): 300-314.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Temuco, Chile; octubre, 2023